

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                       |          |
|-----------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>Vorwort</b>                                                        | <b>V</b> |
| Formelzeichen .....                                                   | IX       |
| Indizes .....                                                         | XIII     |
| <b>1      Grundbegriffe</b>                                           | <b>1</b> |
| 1.1      Energie .....                                                | 2        |
| 1.2      Thermodynamische Systeme .....                               | 3        |
| 1.3      Thermodynamischer Zustand .....                              | 5        |
| 1.3.1      Zustandsgrößen einfacher Systeme .....                     | 6        |
| 1.3.2      Intensive und extensive Zustandsgrößen .....               | 6        |
| 1.3.3      Spezifische und molare Zustandsgrößen .....                | 7        |
| 1.3.4      Thermische und kalorische Zustandsgrößen .....             | 10       |
| 1.4      Zustandsgleichungen .....                                    | 11       |
| 1.4.1      Festlegung des thermodynamischen Zustands .....            | 11       |
| 1.4.2      Thermische Zustandsgleichung .....                         | 12       |
| 1.4.3      Kalorische Zustandsgleichungen .....                       | 12       |
| 1.5      Zustandsänderungen .....                                     | 13       |
| 1.5.1      Quasistatische und nichtstatische Zustandsänderungen ..... | 13       |
| 1.5.2      Reversible und irreversible Zustandsänderungen .....       | 16       |
| 1.5.3      Thermodynamischer Prozess und Kreisprozess .....           | 18       |
| 1.6      Temperatur .....                                             | 19       |
| 1.6.1      Gesetzliche Festlegung .....                               | 19       |
| 1.6.2      Thermisches Gleichgewicht .....                            | 21       |
| 1.6.3      Nullter Hauptsatz .....                                    | 22       |
| 1.6.4      Die Zustandsgröße Temperatur $\vartheta$ .....             | 23       |
| 1.6.5      Temperaturskalen .....                                     | 23       |
| 1.6.6      Thermometer .....                                          | 26       |
| 1.6.6.1      Flüssigkeitsthermometer .....                            | 26       |
| 1.6.6.2      Thermoelemente .....                                     | 28       |
| 1.6.6.3      Widerstandsthermometer .....                             | 30       |

|          |                                                                        |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1.6.6.4  | Strahlungsthermometer .....                                            | 31        |
| 1.7      | Thermodynamisches Gleichgewicht .....                                  | 31        |
| 1.8      | Wärme .....                                                            | 32        |
| 1.9      | Arbeit .....                                                           | 34        |
| 1.9.1    | Volumenarbeit .....                                                    | 37        |
| 1.9.2    | Verschiebearbeit .....                                                 | 38        |
| 1.9.3    | Mechanische Arbeit .....                                               | 38        |
| 1.9.4    | Technische Arbeit .....                                                | 39        |
| 1.10     | Dissipationsenergie .....                                              | 39        |
| 1.11     | Innere Energie, Gesamtenergie eines Systems .....                      | 40        |
| 1.12     | Enthalpie .....                                                        | 41        |
| 1.13     | Entropie .....                                                         | 41        |
| 1.14     | Exergie, Anergie .....                                                 | 42        |
| 1.15     | Idealisierungen .....                                                  | 43        |
| 1.15.1   | Reversible Zustandsänderung .....                                      | 43        |
| 1.15.2   | Ideales Gas .....                                                      | 43        |
| 1.16     | Erfahrungssätze .....                                                  | 43        |
| 1.17     | Diagramme .....                                                        | 44        |
| 1.17.1   | Aufbau der Diagramme .....                                             | 44        |
| 1.17.2   | Darstellung bei reversiblen und irreversiblen Zustandsänderungen ..... | 45        |
| 1.17.3   | Volumenarbeit im $p, v$ -Diagramm .....                                | 46        |
| 1.17.4   | Darstellung von Kreisprozessen im $p, v$ -Diagramm .....               | 49        |
| 1.18     | Mathematische Beziehungen .....                                        | 51        |
| 1.18.1   | Unterschied zwischen Zustandsgrößen und Prozessgrößen .....            | 51        |
| 1.18.2   | Das vollständige Differential .....                                    | 54        |
| 1.18.3   | Integrierender Faktor .....                                            | 57        |
| <b>2</b> | <b>Der 1. Hauptsatz</b> .....                                          | <b>61</b> |
| 2.1      | Der 1. Hauptsatz für geschlossene Systeme .....                        | 61        |
| 2.1.1    | Gleichwertigkeit von Wärme und Arbeit .....                            | 61        |
| 2.1.2    | Innere Energie .....                                                   | 63        |
| 2.1.3    | Mathematische Form des 1. Hauptsatzes für geschlossene Systeme .....   | 64        |
| 2.1.4    | Der 1. Hauptsatz für Kreisprozesse .....                               | 65        |
| 2.1.5    | Formulierungen und Folgerungen .....                                   | 67        |
| 2.1.6    | Bewegtes geschlossenes System .....                                    | 69        |
| 2.1.7    | Enthalpie .....                                                        | 70        |

|          |                                                                     |           |
|----------|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.2      | Der 1. Hauptsatz für offene Systeme .....                           | 72        |
| 2.2.1    | Stationäre Strömung; instationäre Strömung .....                    | 72        |
| 2.2.2    | Technische Arbeit, Leistung .....                                   | 73        |
| 2.2.3    | Modell und Energiebilanz für das offene System .....                | 74        |
| 2.2.4    | Mathematische Form des 1. Hauptsatzes für offene Systeme .....      | 77        |
| 2.2.5    | Technische Arbeit im $p, v$ -Diagramm .....                         | 78        |
| 2.3      | Thermischer Wirkungsgrad und Leistungszahl .....                    | 80        |
| 2.3.1    | Thermischer Wirkungsgrad von Wärmekraftprozessen .....              | 80        |
| 2.3.2    | Leistungszahl für Kälte- und Wärmepumpenprozesse .....              | 82        |
| 2.4      | Wärmekapazität .....                                                | 83        |
| 2.4.1    | Spezifische Wärmekapazität, molare Wärmekapazität .....             | 83        |
| 2.4.2    | Mittlere spezifische Wärmekapazität .....                           | 85        |
| 2.5      | Zusammenstellung der mathematischen Formen des 1. Hauptsatzes ..... | 88        |
| 2.5.1    | Geschlossenes System .....                                          | 88        |
| 2.5.1.1  | Ruhendes geschlossenes System .....                                 | 88        |
| 2.5.1.2  | Bewegtes geschlossenes System .....                                 | 88        |
| 2.5.2    | Offenes System, stationäre Durchströmung .....                      | 89        |
| 2.5.3    | Kreisprozess .....                                                  | 89        |
| <b>3</b> | <b>Ideale Gase</b> .....                                            | <b>93</b> |
| 3.1      | Thermische Zustandsgleichung idealer Gase .....                     | 93        |
| 3.2      | Kalorische Zustandsgleichungen idealer Gase .....                   | 97        |
| 3.3      | Theoretische Bestimmung von Zustandsgrößen .....                    | 99        |
| 3.3.1    | Kinetische Gastheorie .....                                         | 99        |
| 3.3.2    | Molare innere Energie und molare Wärmekapazität .....               | 102       |
| 3.4      | Entropie idealer Gase .....                                         | 104       |
| 3.5      | Das $T, s$ -Diagramm .....                                          | 105       |
| 3.6      | Kriterien und Beziehungen für ideale Gase .....                     | 108       |
| 3.7      | Einfache Zustandsänderungen idealer Gase .....                      | 110       |
| 3.7.1    | Isochore Zustandsänderung .....                                     | 111       |
| 3.7.2    | Isobare Zustandsänderung .....                                      | 113       |
| 3.7.3    | Isotherme Zustandsänderung .....                                    | 114       |
| 3.7.4    | Adiabate Zustandsänderung .....                                     | 116       |
| 3.7.5    | Polytrope Zustandsänderung .....                                    | 118       |
| 3.8      | Zustandsänderungen bei instationären Vorgängen .....                | 123       |
| 3.8.1    | Füllen eines Behälters mit idealem Gas .....                        | 123       |
| 3.8.2    | Ausströmen eines idealen Gases aus einem Behälter .....             | 125       |

|          |                                                                          |            |
|----------|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.9      | Der Carnot-Prozess für ideale Gase .....                                 | 128        |
| 3.9.1    | Der rechtsgängige Prozess: Wärmekraftprozess .....                       | 128        |
| 3.9.2    | Der linksgängige Prozess: Kälteprozess bzw. Wärmepumpenprozess .....     | 132        |
| <b>4</b> | <b>Der 2. Hauptsatz</b> .....                                            | <b>139</b> |
| 4.1      | Formulierungen des 2. Hauptsatzes .....                                  | 139        |
| 4.2      | Folgesätze des 2. Hauptsatzes .....                                      | 141        |
| 4.2.1    | Erster Folgesatz .....                                                   | 141        |
| 4.2.2    | Zweiter und Dritter Folgesatz .....                                      | 142        |
| 4.2.3    | Vierter Folgesatz .....                                                  | 143        |
| 4.2.4    | Fünfter Folgesatz .....                                                  | 144        |
| 4.2.5    | Sechster Folgesatz .....                                                 | 147        |
| 4.3      | Die Entropie .....                                                       | 149        |
| 4.3.1    | Definition der Entropie .....                                            | 149        |
| 4.3.2    | Hauptgleichung der Thermodynamik .....                                   | 152        |
| 4.3.3    | Allgemeine thermodynamische Beziehungen .....                            | 152        |
| 4.3.4    | Anwendungen der thermodynamischen Beziehungen .....                      | 155        |
| 4.3.4.1  | Spezifische Wärmekapazität .....                                         | 155        |
| 4.3.4.2  | Kompressibilität, Ausdehnungskoeffizient, Spannungskoeffizient .....     | 156        |
| 4.3.4.3  | Drosselkoeffizienten .....                                               | 158        |
| 4.3.4.4  | Bestimmung der Entropie .....                                            | 161        |
| 4.3.4.5  | Nachweis für $(\partial u / \partial v)_T = 0$ bei idealen Gasen .....   | 162        |
| 4.3.5    | Entropiezunahme bei irreversiblen Prozessen .....                        | 164        |
| 4.3.5.1  | Strömung mit Reibung .....                                               | 164        |
| 4.3.5.2  | Drosselung .....                                                         | 169        |
| 4.3.5.3  | Vermischung und Diffusion .....                                          | 170        |
| 4.3.5.4  | Überströmversuch von Joule .....                                         | 172        |
| 4.3.5.5  | Wärmeübertragung .....                                                   | 172        |
| 4.4      | Wirkungsgrade von arbeitsabgebenden und arbeitsaufnehmenden Maschinen .. | 174        |
| 4.5      | Die Exergie .....                                                        | 175        |
| 4.5.1    | Exergie der Wärme bei $T = \text{const.}$ .....                          | 179        |
| 4.5.2    | Exergie geschlossener Systeme .....                                      | 180        |
| 4.5.2.1  | Isochore Zustandsänderung, $v = \text{const.}$ .....                     | 182        |
| 4.5.2.2  | Isobare Zustandsänderung, $p = \text{const.}$ .....                      | 184        |
| 4.5.2.3  | Exergie für Reaktionen mit gleicher Anfangs- und Endtemperatur .....     | 185        |
| 4.5.3    | Exergie offener stationärer Systeme .....                                | 186        |
| 4.5.4    | Exergieverlust bei irreversiblen Prozessen .....                         | 188        |
| 4.5.5    | Exergetischer Wirkungsgrad .....                                         | 190        |
| 4.5.6    | Exergie-Anergie-Flussbilder .....                                        | 193        |

|          |                                                          |            |
|----------|----------------------------------------------------------|------------|
| <b>5</b> | <b>Mehrphasige Systeme reiner Stoffe</b>                 | <b>203</b> |
| 5.1      | Grundlagen .....                                         | 203        |
| 5.2      | Zustandsgrößen im Zweiphasengebiet .....                 | 206        |
| 5.2.1    | Dampfgehalt .....                                        | 206        |
| 5.2.2    | Spezifisches Volumen .....                               | 207        |
| 5.2.3    | Spezifische innere Energie, Enthalpie und Entropie ..... | 208        |
| 5.3      | Diagramme im Zweiphasengebiet .....                      | 209        |
| 5.3.1    | Temperatur, Volumen-Diagramm; $T, v$ -Diagramm .....     | 209        |
| 5.3.2    | Druck, Volumen-Diagramm; $p, v$ -Diagramm .....          | 210        |
| 5.3.3    | Druck, Temperatur-Diagramm; $p, T$ -Diagramm .....       | 211        |
| 5.3.4    | Zustandsfläche im $p, v, T$ -Raum .....                  | 211        |
| 5.3.5    | Temperatur, Entropie-Diagramm; $T, s$ -Diagramm .....    | 212        |
| 5.3.6    | Enthalpie, Entropie-Diagramm; $h, s$ -Diagramm .....     | 213        |
| 5.3.7    | Druck, Enthalpie-Diagramm; $\log p, h$ -Diagramm .....   | 214        |
| 5.4      | Zustandsgleichungen und Zahlentafeln .....               | 214        |
| 5.5      | Einfache Zustandsänderungen im Zweiphasengebiet .....    | 217        |
| 5.5.1    | Isobare, isotherme Zustandsänderung .....                | 217        |
| 5.5.2    | Isochore Zustandsänderung .....                          | 218        |
| 5.5.3    | Adiabate Zustandsänderung .....                          | 219        |
| 5.5.4    | Isenthalpe Zustandsänderung (irreversibel adiabat) ..... | 220        |
| 5.6      | Die Clausius-Clapeyron-Gleichung .....                   | 221        |
| 5.7      | Kreisprozesse mit Dämpfen .....                          | 222        |
| 5.7.1    | Dampfkraftprozesse (Rechtsgängige Prozesse) .....        | 222        |
| 5.7.1.1  | Der Carnot-Prozess .....                                 | 225        |
| 5.7.1.2  | Der Clausius-Rankine-Prozess .....                       | 226        |
| 5.7.2    | Kaltdampfprozesse (Linksgängige Prozesse) .....          | 229        |
| 5.7.2.1  | Linksgängiger Carnot-Prozess .....                       | 231        |
| 5.7.2.2  | Der Kaltdampfprozess als Kälteprozess .....              | 231        |
| 5.7.2.3  | Der Wärmepumpenprozess .....                             | 233        |
| 5.8      | Dreiphasengebiet .....                                   | 235        |
| 5.8.1    | Zustandsdiagramme .....                                  | 235        |
| 5.8.2    | Die Clausius-Clapeyron-Gleichung .....                   | 238        |
| <b>6</b> | <b>Gemische von Gasen</b>                                | <b>245</b> |
| 6.1      | Zusammensetzung, Konzentration .....                     | 245        |
| 6.2      | Gemische idealer Gase .....                              | 248        |
| 6.2.1    | Zustandsgleichung, Gaskonstante .....                    | 248        |

|          |                                                                               |            |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.2.2    | Innere Energie, Enthalpie, Wärmekapazitäten.....                              | 250        |
| 6.2.3    | Entropie .....                                                                | 251        |
| 6.2.4    | Exergie .....                                                                 | 252        |
| 6.2.5    | Zusammenstellung der Konzentrationsmaße; Zusammenstellung von Größen ..       | 253        |
| 6.3      | Luft-Wasserdampf-Gemische (Feuchte Luft) .....                                | 255        |
| 6.3.1    | Konzentrationsmaße .....                                                      | 255        |
| 6.3.2    | Zustandsgrößen .....                                                          | 259        |
| 6.3.2.1  | Dichte des Gemisches .....                                                    | 259        |
| 6.3.2.2  | Enthalpie des Gemisches .....                                                 | 260        |
| 6.3.3    | Das $h, x$ -Diagramm .....                                                    | 262        |
| 6.3.4    | Anwendungen des $h, x$ -Diagrammes .....                                      | 265        |
| 6.3.4.1  | Erwärmung und Kühlung bei konstantem Dampfgehalt ( $x = \text{const.}$ )..... | 265        |
| 6.3.4.2  | Trocknung feuchter Luft ( $x \neq \text{const.}$ ).....                       | 267        |
| 6.3.4.3  | Adiabate Vermischung zweier feuchter Luftströme.....                          | 268        |
| 6.3.4.4  | Zugabe von Flüssigkeit oder Dampf.....                                        | 270        |
| 6.3.4.5  | Verdunstungskühlung (Nasskühlung).....                                        | 272        |
| 6.3.4.6  | Das Psychrometer-Prinzip .....                                                | 274        |
| 6.4      | Binäre zweiphasige Systeme (Zweistoff-Zweiphasen-Gemisch).....                | 277        |
| 6.4.1    | Darstellung des Siedens und Kondensierens im Phasendiagramm .....             | 277        |
| 6.4.1.1  | Das $T, x$ -Diagramm .....                                                    | 277        |
| 6.4.1.2  | Das $p, x$ -Diagramm .....                                                    | 279        |
| 6.4.1.3  | Gemische mit azeotropem Punkt .....                                           | 280        |
| 6.4.2    | Das Enthalpie-, Konzentrations-Diagramm ( $h, w$ ) .....                      | 281        |
| <b>7</b> | <b>Vergleichsprozesse mit idealem Gas</b>                                     | <b>287</b> |
| 7.1      | Allgemeines .....                                                             | 287        |
| 7.1.1    | Arbeit, Leistung, Mitteldruck .....                                           | 288        |
| 7.1.2    | Arbeitsmitteldurchsatz .....                                                  | 289        |
| 7.2      | Rechtsgängige Prozesse .....                                                  | 290        |
| 7.2.1    | Wirkungsgrade.....                                                            | 290        |
| 7.2.2    | Carnot-Prozess.....                                                           | 291        |
| 7.2.3    | Vergleichsprozesse für Otto-Motor und Diesel-Motor .....                      | 292        |
| 7.2.3.1  | Annahmen für den Vergleichsprozess .....                                      | 294        |
| 7.2.3.2  | Definitionen .....                                                            | 294        |
| 7.2.3.3  | Wirkungsgrade.....                                                            | 296        |
| 7.2.3.4  | Mitteldruck .....                                                             | 298        |
| 7.2.3.5  | Vergleich des realen Otto-Prozesses mit dem Vergleichsprozess .....           | 299        |
| 7.2.4    | Stirlingmotor .....                                                           | 300        |
| 7.2.4.1  | Stirling-Prozess .....                                                        | 300        |
| 7.2.4.2  | Thermischer Wirkungsgrad .....                                                | 302        |

|          |                                                                                     |            |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.2.4.3  | Mitteldruck .....                                                                   | 302        |
| 7.2.5    | Heißgasmotor .....                                                                  | 303        |
| 7.2.5.1  | Ericson-Prozess .....                                                               | 303        |
| 7.2.5.2  | Thermischer Wirkungsgrad .....                                                      | 304        |
| 7.2.5.3  | Mitteldruck .....                                                                   | 304        |
| 7.2.6    | Gasturbinenanlagen, Strahltriebwerke .....                                          | 305        |
| 7.2.6.1  | Offene und geschlossene Gasturbinenanlagen ohne Wärmerückführung .....              | 305        |
| 7.2.6.2  | Joule-Prozess .....                                                                 | 305        |
| 7.2.6.3  | Offene und geschlossene Gasturbinenanlagen mit Wärmerückführung .....               | 308        |
| 7.2.6.4  | Strahltriebwerke .....                                                              | 310        |
| 7.2.6.5  | Raketen .....                                                                       | 314        |
| 7.2.6.6  | Äußerer Wirkungsgrad und Gesamtwirkungsgrad von Strahltriebwerken und Raketen ..... | 315        |
| 7.2.7    | Vergleich der Vergleichsprozesse .....                                              | 316        |
| 7.3      | Linksgängige Prozesse .....                                                         | 318        |
| 7.3.1    | Verdichter (Kompressoren) .....                                                     | 318        |
| 7.3.1.1  | Vergleichsprozess .....                                                             | 319        |
| 7.3.1.2  | Arbeit, Leistung .....                                                              | 320        |
| 7.3.1.3  | Wirkungsgrade .....                                                                 | 321        |
| 7.3.1.4  | Definitionen .....                                                                  | 321        |
| 7.3.2    | Mehrstufige Verdichter .....                                                        | 323        |
| 7.3.3    | Gaskältemaschinen .....                                                             | 325        |
| 7.3.3.1  | Stirling-Prozess .....                                                              | 326        |
| 7.3.3.2  | Linde-Verfahren zur Luftverflüssigung .....                                         | 328        |
| <b>8</b> | <b>Vergleichsprozesse mit Dämpfen</b>                                               | <b>337</b> |
| 8.1      | Dampfkraftanlagen .....                                                             | 337        |
| 8.1.1    | Thermodynamische Mitteltemperatur und Wirkungsgrade .....                           | 338        |
| 8.1.2    | Exergetische Wirkungsgrade .....                                                    | 339        |
| 8.1.3    | Clausius-Rankine-Prozess .....                                                      | 341        |
| 8.1.3.1  | Clausius-Rankine-Prozess mit Zwischenüberhitzung .....                              | 342        |
| 8.1.3.2  | Regenerative Speisewasservorwärmung .....                                           | 343        |
| 8.1.4    | Gas-Dampf-Kraftprozesse (GD-Prozesse) .....                                         | 346        |
| 8.2      | Kaltdampfprozesse .....                                                             | 348        |
| 8.2.1    | Exergetische Behandlung von Kälteprozessen .....                                    | 349        |
| 8.2.2    | Irreversibel ablaufende Kälteprozesse .....                                         | 351        |
| <b>9</b> | <b>Strömungsvorgänge</b>                                                            | <b>357</b> |
| 9.1      | Allgemeines .....                                                                   | 357        |
| 9.2      | Grundlagen .....                                                                    | 357        |

|           |                                                                                                                   |            |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 9.3       | Strömung kompressibler Medien in Düsen und Diffusoren .....                                                       | 360        |
| 9.3.1     | Düsen und Diffusoren .....                                                                                        | 360        |
| 9.3.2     | Ausströmung aus Behältern durch sich verengende Düsen .....                                                       | 361        |
| 9.3.2.1   | Ausströmgeschwindigkeit .....                                                                                     | 361        |
| 9.3.2.2   | Ausströmende Masse, Durchflussfunktion .....                                                                      | 363        |
| 9.3.2.3   | Schallgeschwindigkeit .....                                                                                       | 367        |
| 9.3.2.4   | Schallgeschwindigkeit bei Ausströmung aus einer sich verengenden Düse ....                                        | 367        |
| 9.3.3     | Strömung durch konvergente Düsen .....                                                                            | 371        |
| 9.3.4     | Laval-Düse .....                                                                                                  | 372        |
| 9.3.4.1   | Grundlagen .....                                                                                                  | 372        |
| 9.3.4.2   | Zusammenstellung der Gleichungen .....                                                                            | 375        |
| 9.3.4.3   | Druck- und Geschwindigkeitsverlauf in einer Laval-Düse und in Diffusoren<br>wenn $c_0 = 0$ und $c_0 \neq 0$ ..... | 376        |
| 9.3.5     | Verdichtungsstöße .....                                                                                           | 381        |
| 9.3.5.1   | Grundgleichungen .....                                                                                            | 382        |
| 9.3.5.2   | Darstellung des Verdichtungsstoßes im Diagramm .....                                                              | 387        |
| 9.3.6     | Bewertungsgrößen von Düsen und Diffusoren .....                                                                   | 389        |
| <b>10</b> | <b>Verbrennungsprozesse</b> .....                                                                                 | <b>397</b> |
| 10.1      | Allgemeines .....                                                                                                 | 397        |
| 10.1.1    | Größen und Symbole .....                                                                                          | 399        |
| 10.2      | Brennwert, Heizwert .....                                                                                         | 400        |
| 10.2.1    | Brennwert .....                                                                                                   | 400        |
| 10.2.1.1  | Messung des Brennwertes .....                                                                                     | 402        |
| 10.2.1.2  | Temperaturabhängigkeit der Reaktionsenthalpie .....                                                               | 404        |
| 10.2.2    | Heizwert .....                                                                                                    | 404        |
| 10.2.3    | Berechnung von Brennwert und Heizwert .....                                                                       | 406        |
| 10.2.3.1  | Brennstoffgemische .....                                                                                          | 407        |
| 10.2.3.2  | Chemische Verbindungen .....                                                                                      | 407        |
| 10.2.3.3  | Verbandsformeln .....                                                                                             | 408        |
| 10.3      | Sauerstoff- und Luftbedarf .....                                                                                  | 410        |
| 10.3.1    | Mindestbedarf an Sauerstoff für feste und flüssige Brennstoffe .....                                              | 410        |
| 10.3.2    | Mindestbedarf an Sauerstoff für gasförmige Brennstoffe .....                                                      | 411        |
| 10.3.3    | Luftbedarf und Luftüberschuss .....                                                                               | 412        |
| 10.4      | Brennstoffkennzahlen .....                                                                                        | 415        |
| 10.4.1    | Kennzahl für den Sauerstoffbedarf, $\sigma$ .....                                                                 | 415        |
| 10.4.2    | Kennzahl für den Stickstoffgehalt, $\nu$ .....                                                                    | 417        |
| 10.5      | Rauchgase .....                                                                                                   | 417        |
| 10.5.1    | Feuchte Rauchgase fester und flüssiger Brennstoffe .....                                                          | 417        |
| 10.5.2    | Feuchte Rauchgase gasförmiger Brennstoffe .....                                                                   | 419        |

|                     |                                                                |            |
|---------------------|----------------------------------------------------------------|------------|
| 10.5.3              | Näherungsgleichungen .....                                     | 421        |
| 10.5.4              | Trockene Rauchgase .....                                       | 421        |
| 10.5.5              | Anwendung für die Rauchgasanalyse .....                        | 422        |
| 10.6                | Verbrennungstemperatur .....                                   | 423        |
| 10.6.1              | Rauchgasenthalpie und Rauchgastemperatur .....                 | 423        |
| 10.6.2              | Maximale Verbrennungstemperatur .....                          | 425        |
| 10.6.3              | Schornsteinverluste .....                                      | 427        |
| 10.6.4              | Wärmekapazität der Rauchgase .....                             | 428        |
| 10.6.5              | Das $h, \vartheta$ -Diagramm .....                             | 429        |
| 10.7                | Feuerungswirkungsgrad .....                                    | 432        |
| 10.8                | Irreversibilität der Verbrennung .....                         | 433        |
| 10.8.1              | Reaktionsarbeit und Reaktionsentropie .....                    | 433        |
| 10.8.2              | Absolute Entropie, Dritter Hauptsatz, Standardentropie .....   | 435        |
| 10.8.3              | Brennstoffexergie .....                                        | 438        |
| 10.8.4              | Exergieverluste bei der Verbrennung .....                      | 441        |
| 10.8.5              | Exergetischer Wirkungsgrad .....                               | 443        |
| <b>Anhang</b> ..... |                                                                | <b>451</b> |
| Anhang 1:           | Lösungen der Aufgaben .....                                    | 451        |
| Anhang 2:           | Thermodynamische Größen einiger Stoffe .....                   | 460        |
| Anhang 3:           | Berechnung der Zustandsgrößen von Wasser und Wasserdampf ..... | 460        |
| Anhang 4:           | $h, x$ -Diagramm .....                                         | 475        |
| Anhang 5:           | Wirkungsgrade von Energiewandlungsanlagen in der Technik ..... | 476        |
| Anhang 6:           | Beispiele für Energien und Leistungen .....                    | 477        |
| Anhang 7:           | Beispiele für Leistungsdichten .....                           | 477        |
| Anhang 8:           | Tripelpunkte und kritische Daten einiger Stoffe .....          | 478        |
| Anhang 9:           | Literatur .....                                                | 479        |
| Anhang 10:          | Sachverzeichnis .....                                          | 482        |